

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Varga

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Student:

Josip Varga

Zagreb, 2016.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim u svojem dosadašnjem studiju te informacijama iz navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc Goranu Krajačiću te dipl.ing. Nikoli Matku na pruženoj stručnoj pomoći te ustupljenom vremenu pri samoj izradi završnog rada.

Također, želim se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom mog dosadašnjeg školovanja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Josip Varga

Mat. br.: 0035188468

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sunčani fotonaponski sustavi integrirani u pročelje poslovne zgrade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Service building integrated solar photovoltaic systems**

Opis zadatka:

Napretkom tehnologije izrade te značajnim padom cijena fotonaponskih (PV) modula sve više vlasnika poslovnih zgrada integrira PV sustave u njihova pročelja. Visoke cijene PV sustava ograničavale su ugradnju samo na krovove te eventualno pročelja na južnoj strani zgrade, no danas sve raspoložive površine postaju zanimljive za ugradnju. Uzimajući u obzir položaj i gabarite južne zgrade Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu potrebno je napraviti prijedlog rješenja te tehno-ekonomsku analizu ugradnje solarnih PV panela u pročelje zgrade.

U radu je potrebno:

1. Napraviti pregled literature i opisati rješenja integriranih PV sustava s glavnim tehno-ekonomskim karakteristikama.
2. Prema prikupljenim podacima i procjeni zasjenjivanja ploha, odrediti pogodne površine za ugradnju PV sustava te odrediti glavne karakteristike sustava (učinkovitost, cijenu glavne i pomoćne opreme te trošak ugradnje i održavanja).
3. Prema podacima PVGIS ili Meteonorm programa odrediti dozračenu energiju na jedinicu površine te proračunati moguću satnu, mjesečnu i godišnju proizvodnju električne energije.
4. Odrediti proizvodnu cijenu električne energije te isplativost ugradnje PV sustava uzimajući u obzir podatke iz literature, zajamčenu otkupnu cijenu električne energije sukladno Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 100/15) te postojećem tarifnom modelu za poslovne korisnike objavljenom na web stranicama HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o., prosječnu godišnju kamatnu stopu EIBa za 2014. god., potrošnju električne energije u zgradi i proizvodnju električne energije dobivenu u 3.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
1.1 Fotonaponski (PV) sustavi	1
1.2 Mrežni fotonaponski sustavi	1
1.3 PV sustavi u zgradarstvu	2
1.4 PV sustav na južnoj zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje	3
2. METODE	4
2.1 Zasjenjivanje	4
2.2 PVGIS	5
2.3 Odabir solarnih modula	6
2.4 Površina sustava	6
2.5 Odabir ostale opreme PV sustava	6
2.6 Proračun moguće proizvodnje električne energije	7
2.7 Ekonomski plan	7
3. PODACI	8
3.1 Dimenzije južne zgrade	8
3.2 Potrošnja električne energije južne zgrade	9
4. PRORAČUNI I REZULTATI	11
4.1 Zasjenjivanje	11
4.2 Dozračena energija	14
4.2.1 Visoko prizemlje	14
4.2.2 Neboder	15
4.3 Odabir fotonaponskog modula	16

4.4 Određivanje površine sustava	17
4.4.1 Visoko prizemlje	17
4.4.2 Neboder	19
4.5 Odabir ostale opreme PV sustava	23
4.5.1 Nosači PV modula za ravni krov	23
4.5.2 Nosač PV modula za pročelje.....	23
4.5.3 Pretvarač DC/AC	24
4.5.4 Preostala oprema i radovi	24
4.6 Proizvodnja električne energije	25
4.7 Ekonomski plan	28
4.7.1 Proizvodna cijena električne energije	28
4.7.2. Zajamčena otkupna cijena električne energije.....	30
4.7.3 Procjena isplativosti izgradnje sustava.....	36
5. ZAKLJUČAK	41
6. PRILOZI	42
7.LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1 PV sustavi na stambenim zgradama u Freiburgu.....	2
Slika 2 Određivanje duljine sjene	4
Slika 3 Sučelje PVGIS programa.....	5
Slika 4 Tlocrt južne zgrade s dimenzijama.....	8
Slika 5 Tlocrt nebodera s dimenzijama	9
Slika 6 Simulacija zasjenjivanja u FindMyShadow programu	11
Slika 7 Zasjenjenje visokog prizemlja od strane nebodera.....	13
Slika 8 Fotonaponski modul Yingli Panda 280W	16
Slika 9 Optimalna udaljenost redova PV modula	17
Slika 10 Krovšte visokog prizemlja s PV modulima i zasjenjivanjem.....	18
Slika 11 Južno pročelje nebodera s PV modulima	20
Slika 12 Bočno pročelje nebodera s PV modulima.....	21
Slika 13 Krovšte nebodera s PV modulima	22
Slika 14 Nosač PV modula SOLE SL-FRT-SL-3	23
Slika 15 Pretvarač Aurora TRIO-27.6-TL	24

POPIS TABLICA

Tablica 1 Tarifni model crveni za poslovne korisnike	10
Tablica 2 Mjesečna potrošnja električne energije južne zgrade.....	10
Tablica 3 Prosječna duljina sjene nebodera	12
Tablica 4 Dozračena energija na krovu visokog prizemlja	14
Tablica 5 Dozračena energija na neboderu	15
Tablica 6 Ozračena površina na krovu visokog prizemlja	19
Tablica 7 Ukupna dozračena energija na sustav	25
Tablica 8 Mjesečna proizvodnja električne energije.....	26
Tablica 9 Faktor iskoristivosti PV modula	27
Tablica 10 Godišnja proizvodnja električne energije	27
Tablica 11 Cijena opreme i izvođenja radova	29
Tablica 12 Razlika proizvodnje i potrošnje električne energije.....	31
Tablica 13 Zajamčena otkupna cijena električne energije sustava s dva brojila.....	32
Tablica 14 Godišnja promjena C_i sustava s dva brojila.....	33
Tablica 15 Godišnja promjena C_i sustava s dvosmjernim brojiлом za kolovoz	34
Tablica 16 Godišnja zarada sustava s dvosmjernim brojiлом	36
Tablica 17 Novčani tok sustava s dva brojila	38
Tablica 18 Novčani tok sustava s dvosmjernim brojiлом	39
Tablica 19 Novčani tok sustava s dvosmjernim brojiлом i sufinanciranjem	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_{RM}	[°]	Međusobni razmak redova modula
l_{FNM}	[m]	Duljina modula
β	[°]	Nagib modula u odnosu na vodoravnu plohu
α_s	[°]	Visina sunca
$LCOE$	[kn/kWh]	Proizvodna cijena električne energije
I_t	[kn]	Investicijski troškovi u vremenskom periodu t
M_t	[kn]	Troškovi održavanja u vremenskom periodu t
F_t	[kn]	Troškovi goriva u vremenskom periodu t
E_t	[kWh]	Proizvedena električna energija u vremenskom periodu t
r	-	Diskontna stopa
n	[god]	Radni vijek trajanja sustava
E_{pi}	[kWh]	Ukupna električna energija preuzeta iz mreže unutar obračunskog razdoblja i
E_{ii}	[kWh]	Ukupna električna energija isporučena u mrežu unutar obračunskog razdoblja i
C_i	[kn/kWh]	Otkupna cijena proizvedene električne energije u obračunskom razdoblju i
PKC_i	[kn/kWh]	Prosječna cijena električne energije preuzete iz mreže, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja i
C_{VTi}	[kn/kWh]	Cijena preuzete električne energije u visokoj tarifi u obračunskom razdoblju i
U_{VTi}	-	Udio preuzete električne energije u visokoj tarifi u obračunskom razdoblju i
C_{NTi}	[kn/kWh]	Cijena preuzete električne energije u niskoj tarifi u obračunskom razdoblju i
U_{NTi}	-	Udio preuzete električne energije u niskoj tarifi u obračunskom razdoblju i
P_i	[kWh]	Proizvedena električna energija u obračunskom razdoblju i
VT_i	[kWh]	Preuzeta električna energija u visokoj tarifi u obračunskom razdoblju i

SAŽETAK

Napretkom tehnologije i padom cijena, fotonaponski sustavi postaju sve zastupljeniji način proizvodnje električne energije. Njihov najveći potencijal nalazi se u sustavima integriranim u krovništa i pročelja zgrada. U ovome radu prikazan je postupak procjene isplativosti izgradnje jednog takvog fotonaponskog sustava.

Iz arhitektonskih nacрта dobivene su dimenzije potrebnih dijelova zgrade. Korištenjem računalnih programa FindMyShadow te PlanetCalc određene su površine koje su povoljne za postavljanje fotonaponskog sustava. Računalnim programom PVGIS dobivena je dozračena sunčeva energija na te površine. Odabirom opreme fotonaponskog sustava određena je njegova cijena te ukupna površina fotonaponskih modula koja se može postaviti na odabrane površine. Uzimajući u obzir faktor iskoristivosti svih komponenata sustava izračunata je moguća mjesečna te godišnja proizvodnja električne energije.

Koristeći podatke o mjesečnoj potrošnji električne energije napravljena je ekonomska procjena isplativosti izgradnje sustava. Analiza je napravljena za dvije varijante sustava. Prva varijanta je sustav s dva brojila kod kojeg se proizvedena električna energija prodaje, a električna energija koja se troši se kupuje iz elektroenergetskog sustava. Druga varijanta je sustav koji koristi dvosmjerno brojilo koje pokazuje razliku između proizvedene i potrošene električne energije te se u slučaju viška proizvedene električne energije ona prodaje, a u slučaju manjka se kupuje. Rezultati pokazuju da nijedna varijanta sustava nije isplativa ako se cijeli projekt financira kreditiranjem, jer u prvom slučaju IRR iznosi -4,63% dok u drugom slučaju iznosi 2,16% te su obje vrijednosti manje od diskontne stope koja iznosi 5%. Dodatna procjena pokazuje kako varijanta sustava s dvosmjernim brojilom može biti isplativa ako se određeni dio početne investicije sufinancira iz fonda Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost. Za primjer je uzet udio financiranja iz spomenutog fonda od 40% što rezultira vrijednošću IRR-a od 8,23% te je on veći od diskontne stope što znači da je tako financiran sustav isplativ.

SUMMARY

Due to technological improvements and decreasing of costs, photovoltaic systems are becoming considerably more represented method of electricity production. Its greatest potential are building integrated photovoltaic systems. In this paper profitability assessment for one building integrated photovoltaic system will be shown.

Building dimensions were given in architectonic plans. Areas suitable for photovoltaic system installation were determined by using computer programs FindMyShadow and PlanetCalc. Solar irradiation on those areas was calculated using computer program PVGIS. Cost of system and area covered by photovoltaic modules was determined by choosing systems components. Considering systems components efficiency, monthly and annual electricity production was calculated.

Economic profitability assesment was made based on buildings monthly electricity consumption. Analasis was made for two types of system. First system uses two electric meters, one for sold generated electricity and one for bought consumed electricity. Second system uses two-way electric meter which shows the difference between generated and consumed electricity and electricity is bought or sold based on ratio between generation and consumption. Assesment results show that neither of the systems are profitable if they are financed through a bank loan. Value of IRR for first system is -4,63%, while second system has IRR of 2,16% which are both lower than the discount rate of 5%. Additonal assessment shows that second system can be profitable if part of the investment cost is funded by Environmental protection and energy efficiency fund. Assessment showed that for 40% of investment cost funded by Environmental protection and energy efficiency fund, second system shows IRR of 8,43%, which makes it profitable.

1.UVOD

1.1 Fotonaponski (PV) sustavi

Fotonaponski moduli su uređaji koji pretvaraju sunčevo zračenje izravno u električnu energiju bez pomičnih dijelova i potrebe za gorivom te prividno ne stvaraju nikakvo zagađenje tijekom svoga vijeka trajanja [1]. Spajanjem većeg broja modula u jednu cjelinu dobiva se solarni fotonaponski sustav. Iako PV ima potencijal postati vodeća tehnologija za proizvodnju čiste električne energije, još uvijek nije ekonomski konkurentan konvencionalnim načinima proizvodnje velikih količina energije [1]. Unatoč tome, zahvaljujući brzom napretku tehnologije i potrebom za održivim energetskeim sustavima, PV sve više dobiva na značaju u proizvodnji električne energije [1].

Osnovna podjela fotonaponskih sustava:

- Otočni sustavi
- Hibridni sustavi
- Mrežni fotonaponski sustavi

1.2 Mrežni fotonaponski sustavi

Ovakvi sustavi mogu biti izvedeni na dva načina:

- Sustavi spojeni izravno na mrežu
- Sustavi spojeni na mrežu preko kućne instalacije

Sustavi spojeni izravno na mrežu su sustavi velikih površina i snaga te svu proizvedenu električnu energiju predaju u elektroenergetski sustav [2]. Sustavi spojeni na mrežu preko kućne instalacije postavljaju se na krovove i fasade zgrada te svojom proizvodnjom pokrivaju zahtjeve zgrade za električnom energijom dok višak proizvedene energije predaju u elektroenergetski sustav [2].

1.3 PV sustavi u zgradarstvu

U razvijenim zemljama 20-30% električne energije troši se u zgradama [1]. Krovovi i fasade zgrada predstavljaju idealne površine koje se mogu iskoristiti za fotonaponske sustave za proizvodnju električne energije. Gotovo svaka zgrada može zadovoljiti vlastite potrebe za potrošnju električne energije ugradnjom sustava spojenih na mrežu preko kućne instalacije. Upravo u tome leži najveći potencijal PV sustava.

Uobičajeno PV sustavi bili su postavljeni na posebne samostalne konstrukcije [1]. Međutim, mogu biti postavljeni i na zgrade pa čak i kao sami dijelovi zgrada, stvarajući tako izravnu vezu između proizvodnje i potražnje za električnom energijom [1].

Gledajući s arhitektonskog, tehničkog i finacijskog stajališta, današnji PV sustavi u zgradarstvu ne zahtijevaju dodatne površine za instalaciju pa mogu biti primjenjeni u gusto naseljenim područjima te mogu pokriti vršna opterećenja i smanjiti transmisijske i distribucijske gubitke [1]. Također, mogu pokriti sve ili barem značajan dio električne potražnje zgrade na kojoj se nalaze i čak zamijeniti konvencionalne materijale koji se koriste u građevini [1].



Slika 1 PV sustavi na stambenim zgradama u Freiburgu [3]

1.4 PV sustav na južnoj zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje

Uz sve navedene pogodnosti PV sustava integriranih u same zgrade dolazi se do ideje da se jedan takav sustav izgradi na južnoj zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Južna zgrada površinom je najveća te se time nameće kao najbolje rješenje za integrirani PV sustav. S obzirom da je fakultet veliki potrošač električne energije, takav bi sustav mogao uvelike smanjiti potrebu za dobavom iz elektroenergetske mreže.

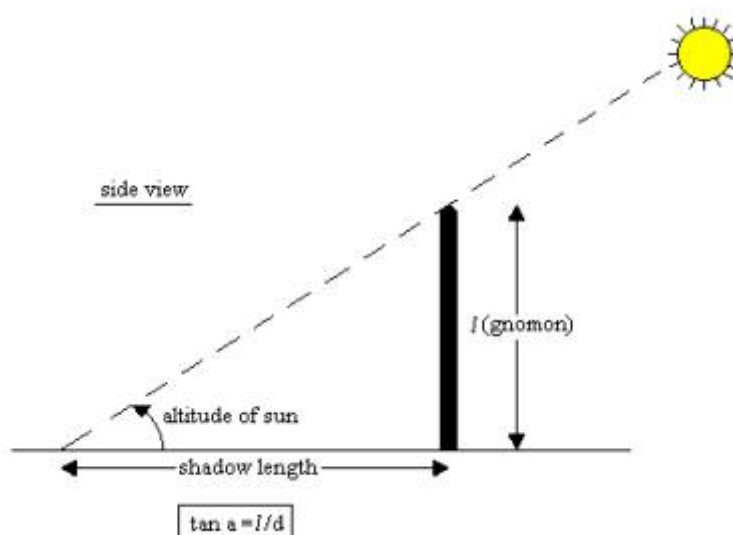
Prvi korak u projektiranju ovakvog sustava je odabir pogodnih površina za postavljanje fotonaponskih modula. Odabiru se one površine koje su većim dijelom ili tijekom cijele godine izložene izravnom sunčevom zračenju kako bi se ostvarila što veća proizvodnja električne energije. Nakon toga slijedi odabir PV modula te kuta njihove inklinacije kako bi se mogao odrediti potreban razmak između redova modula. Izračunavanjem njihove površine i potrebnog razmaka dolazi se do stvarne površine sustava.

Korištenjem jednog od ponuđenih računalnih programa izračunava se mjesečna i godišnja dozračenja sunčeva energija na površinu sustava. Odabiru se preostale komponente sustava te se, uzimajući u obzir njihovu efikasnost, izračunava moguća mjesečna i godišnja proizvodnja električne energije.

Određuje se cijena cijelog sustava te otkupna cijena električne energije. Uzevši u obzir uštedu koja će se ostvariti pokrivanjem zahtjeva zgrade za električnom energijom te zaradu od prodaje viška električne energije procjenjuje se hoće li se izgradnja sustava isplatiti kroz period od 20 godina.

2. METODE

2.1 Zasjenjivanje

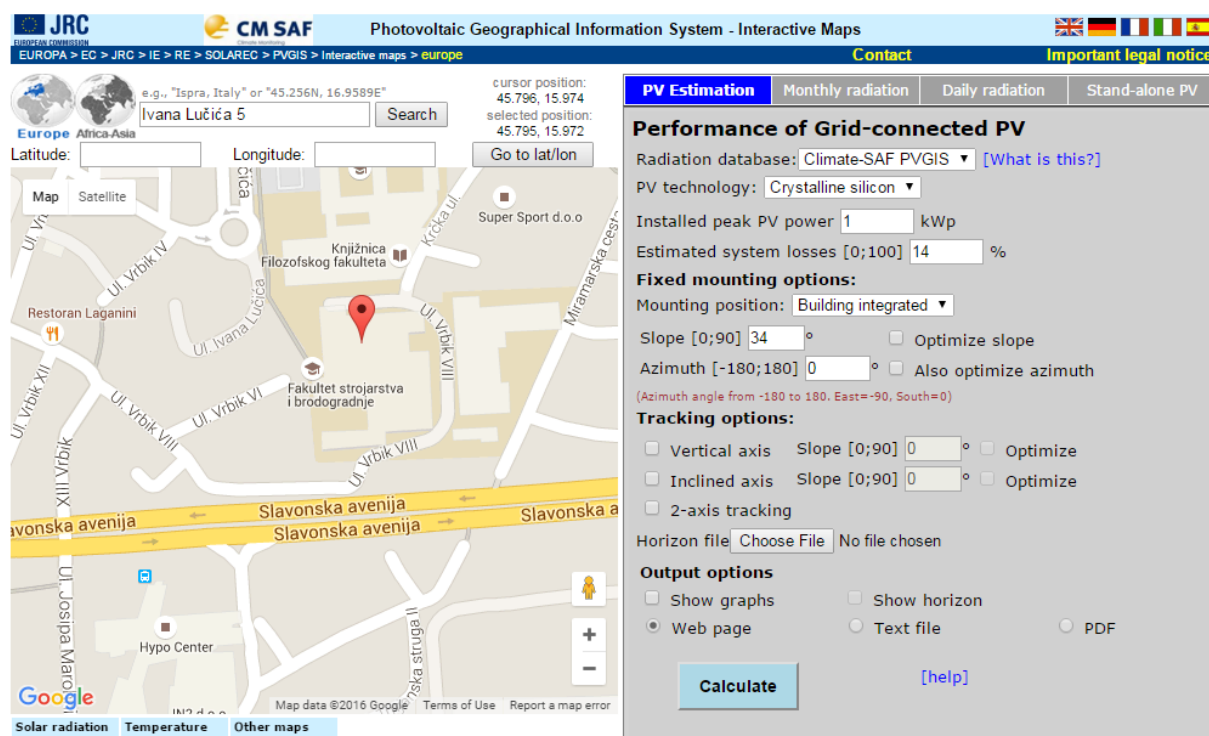


Slika 2 Određivanje duljine sjene [4]

Zasjenjivanje je najvažniji parametar kod određivanja pogodnih površina za postavljanje PV sustava. Najpogodnije su one površine koje cijele godine primaju ukupnu sunčevu dozračenu energiju, odnosno izravnu i difuznu. Kada je površina u sjeni tada onda prima samo difuzno dozračenu energiju, što uvelike smanjuje proizvodnju električne energije. Koristeći računalne programe PlanetCalc i FindMyShadow za zadanu geografsku duljinu i širinu određuje se duljina i smjer sjene u određenim vremenskim intervalima. Ti intervali obično iznose 15 ili 30 minuta, ovisno o programu. Na taj se način točno određuje koliki dio ukupne površine se u kojem trenutku nalazi u sjeni te se prema tome odabire dio površine koji će se koristiti za postavljanje sustava.

2.2 PVGIS

Kako bi se mogla izračunati proizvedena električna energija sustava potrebno je odrediti mjesečnu i godišnju dozračenu sunčevu energiju na odabranu površinu. Za se koristi računalni program PVGIS koji za zadanu geografsku duljinu i širinu te kut inklinacije i orijentaciju fotonaponskih modula daje podatke za dnevnu, mjesečnu, odnosno godišnju dozračenu sunčevu energiju po metru kvadratnom površine. Također, on daje omjer ukupno i difuzno dozračene energije što bitno pojednostavljuje proračun dozračene energije na zasjenjene dijelove površine. Još jedna od prednosti PVGIS programa je što za odabranu lokaciju sam izračunava optimalni kut inklinacije fotonaponskih modula.



Slika 3 Sučelje PVGIS programa [5]

2.3 Odabir solarnih modula

Nakon odabira površina i izračunavanja dozračene energije potrebno je odabrati solarne module koji će se koristiti za analizu. Moduli se biraju iz kataloga koje nude distributeri PV sustava. Za odabrani modul potrebno je znati njegovu cijenu, tehničke karakteristike i dimenzije.

2.4 Površina sustava

Za odabrane solarne module potrebno je napraviti njihov raspored po površinama koje su odabrane za postavljanje PV sustava. Za krovšte visokog prizemlja izračunava se optimalna udaljenost između redova modula kako ne bi došlo do međusobnog zasjenjivanja redova. Nakon toga određuje se položaj i broj modula po pojedinoj površini čime se dolazi do površine te ukupne instalirane snage sustava.

2.5 Odabir ostale opreme PV sustava

U ostalu opremu PV sustava spadaju montažni elementi, kablovi, spojna kutija sa zaštitnom opremom, izmjenjivač DC/AC te brojilo prodane i kupljene energije. Iz kataloga koje nude distributeri opreme PV sustava potrebno je za odabrane komponente odrediti cijenu kako bi se izračunala ukupna cijena sustava što će se koristiti kasnije kod ekonomske analize isplativosti.

2.6 Proračun moguće proizvodnje električne energije

Uz poznatu površinu sustava te dozračenu sunčevu energiju na pojedini dio sustava izračunava se mjesečna i godišnja moguća proizvodnja električne energije. U ovom proračunu uzima se u obzir efikasnost PV modula te efikasnost ostale opreme sustava.

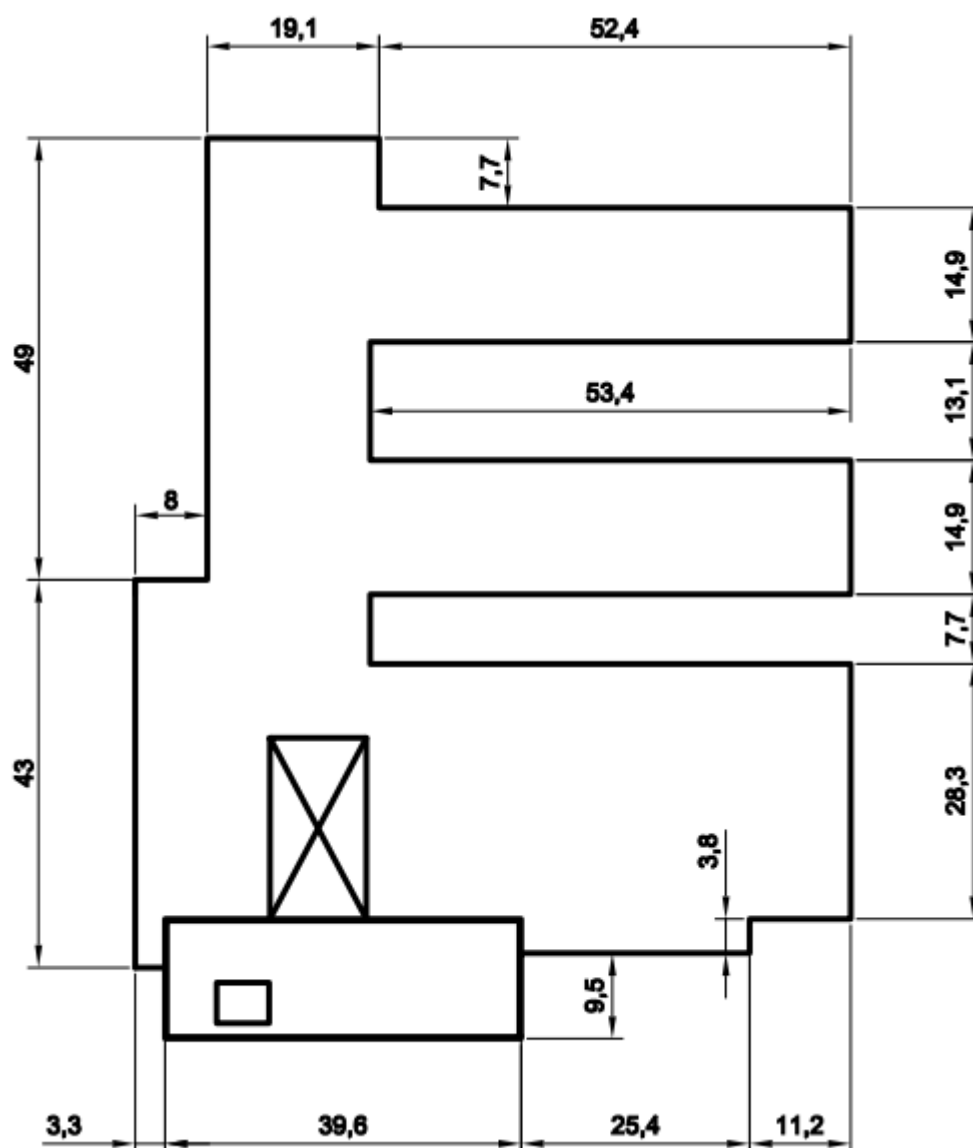
2.7 Ekonomski plan

Nakon odabira opreme i izračuna moguće proizvodnje električne energije potrebno je napraviti ekonomsku analizu isplativosti izgradnje PV sustava. Uz poznavanje cijene sustava i troškova održavanja te godišnje proizvodnje, izračunava se proizvodna cijena električne energije. Prema Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, postojećem tarifnom modelu za poslovne korisnike te prosječnoj kamatnoj stopi Europske investicijske banke, određuje se zajamčena otkupna cijena proizvedene električne energije. Uzevši u obzir vlastitu potrošnju, prema električnoj energiji predanoj u elektroenergetski sustav izrađuje se procjena isplativosti izgradnje sustava u vremenskom periodu od 20 godina.

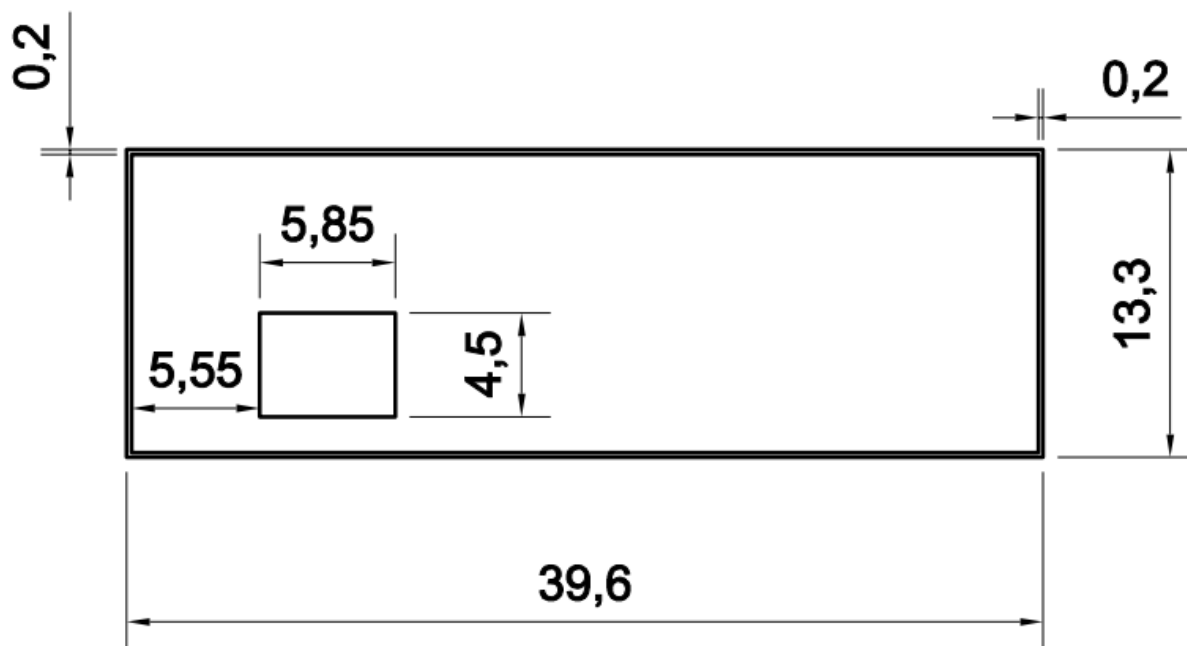
3. PODACI

3.1 Dimenzije južne zgrade

Kako bi se mogle proračunati veličine površina na koje se postavlja sustav potrebno je poznavati dimenzije zgrade. Iz dobivenih arhitektonskih nacрта južne zgrade FSB-a izrađene su skice s dimenzijama pojedinih dijelova zgrade.



Slika 4 Tlocrt južne zgrade s dimenzijama



Slika 5 Tlocrt nebodera s dimenzijama

Dimenzije svih kota prikazanih na skicama su u metrima.

Visina nebodera iznosi 50 metara, dok je mjerenjima utvrđeno da je visina razmaka između prozora na pročelju zgrade 1309 mm, visina uredskih prozora 1483 mm, a visina prozora u hodniku 2783 mm.

3.2 Potrošnja električne energije južne zgrade

Iz godišnje energetske analize južne zgrade dobiveni su podaci o tarifnom modelu koji se koristi te mjesečnoj, odnosno godišnjoj potrošnji električne energije. Južna zgrada koristi crveni tarifni model HEP-a za poslovne korisnike, a cijene električne energije za taj model za 2016. godinu prikazane su Tablicom 1. Te cijene će se koristiti kod procjene isplativosti projekta te se pretpostavlja kako se one neće mijenjati tijekom sljedećih 20 godina.

U Tablici 2 prikazana je mjesečna potrošnja električne energije za 2012. godinu te će se ona koristiti kod procjene isplativosti projekta.

Tablica 1 Tarifni model crveni za poslovne korisnike [6]

Tarifni model crveni		
Tarifni element	Cijena u višoj tarifi [kn/kWh]	Cijena u nižoj tarifi [kn/kWh]
Električna energija	0,91	0,51
Mrežarina	0,25	0,12

Naknada za mrežarinu prikazana u Tablici 1 uračunata je u prikazanu cijenu električne energije.

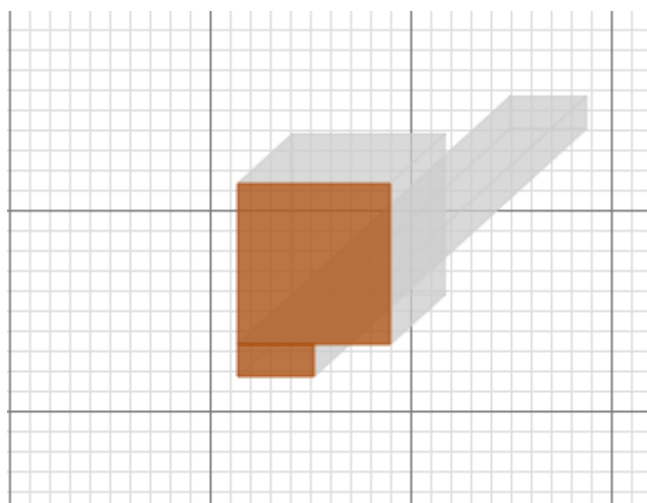
Tablica 2 Mjesečna potrošnja električne energije južne zgrade

Mjesec	Potrošnja u višoj tarifi [kWh]	Potrošnja u nižoj tarifi [kWh]	Ukupna potrošnja [kWh]
Siječanj	64038	27309	91347
Veljača	64132	27297	91429
Ožujak	65131	28145	93276
Travanj	58228	27745	85973
Svibanj	59551	24394	83945
Lipanj	50904	22544	73448
Srpanj	46756	22275	69031
Kolovoz	30344	18259	48603
Rujan	45758	21540	67298
Listopad	59119	23654	82773
Studeni	62470	24229	86699
Prosinac	56510	26177	82687

4. PRORAČUNI I REZULTATI

4.1 Zasjenjivanje

Korištenjem programa FindMyShadow simulirana je putanja sjene kojom neboder južne zgrade zasjenjuje zgradu visokog prizemlja. Simulacija pokazuje promjenu duljine i položaja sjene svakih 15 minuta. Promatra li se promjena duljina sjene nebodera tijekom svog prelaska preko visokog prizemlja može se uočiti kako nema značajne promjene u njevoj duljini te se ona može smatrati konstantnom.



Slika 6 Simulacija zasjenjivanja u FindMyShadow programu [7]

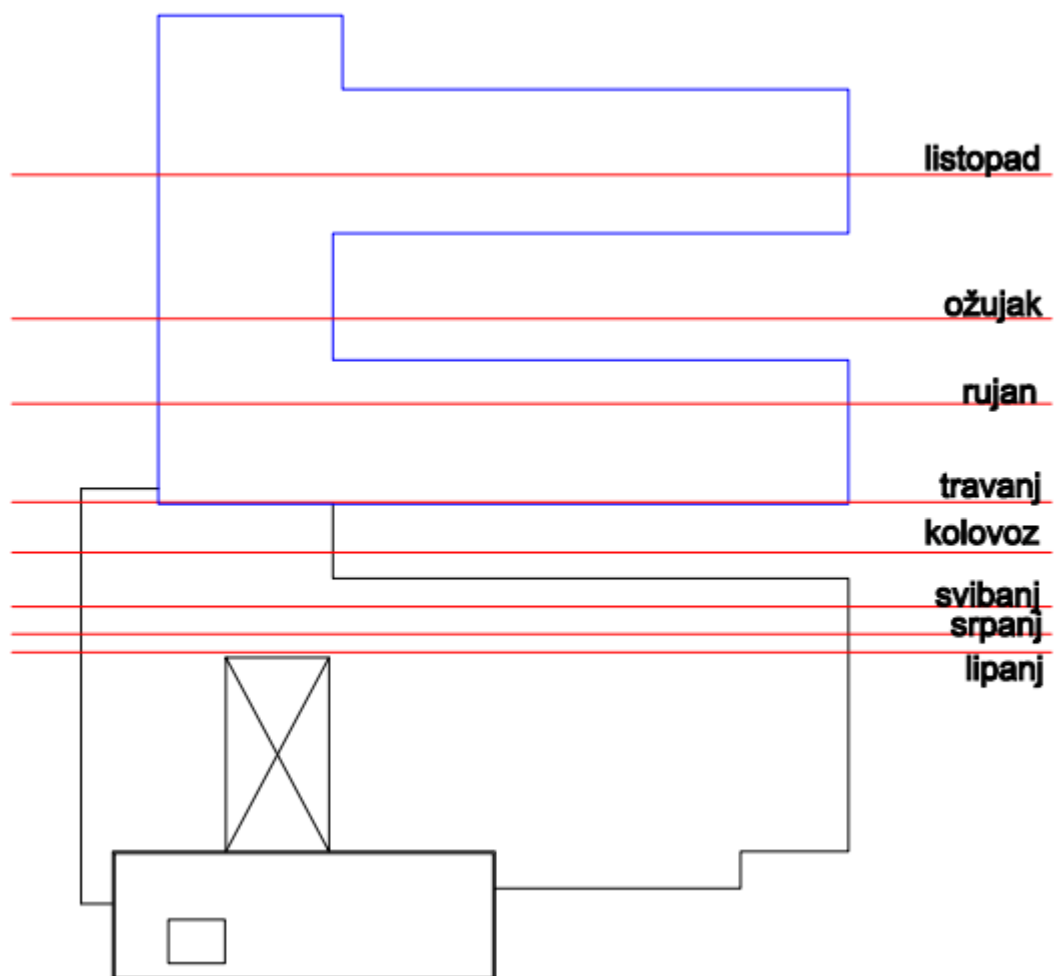
Radi pojednostavljenja proračuna uzeta je pretpostavka da širina sjene nebodera prekriva čitavu širinu krovišta visokog prizemlja. U stvarnosti, određeni dio površine uvijek je izložen izravnom sunčevom zračenju.

Koristeći program PlanetCalc dobivene su točne vrijednosti duljine sjene kojom južna zgrada zasjenjuje visoko prizemlje. Program prikazuje duljinu sjene svakih 30 minuta, a kako je provođenjem gore navedene simulacije zaključeno da se na prostoru visokog prizemlja duljina ne mijenja značajno, kao referentna vrijednost uzima se duljina sjene u 12:00 sati. Kako bi se pojednostavio proračun, za srednju mjesečnu vrijednost duljine sjene uzeta je vrijednost svakog petnaestog dana u mjesecu.

Tablica 3 Prosječna duljina sjene nebodera [8]

Mjesec	Prosječna duljina sjene [m]
Siječanj	118,18
Veljača	82,50
Ožujak	55,17
Travanj	36,21
Svibanj	25,34
Lipanj	20,65
Srpanj	22,54
Kolovoz	30,97
Rujan	46,38
Listopad	70,08
Studen	104,73
Prosinac	130,93

Prosječna duljina sjene nebodera prikazana je u tlocrtu Slikom 7. Površina omeđena plavim linijama predstavlja površinu visokog prizemlja pogodnu za postavljanje PV modula, dok crvene linije označuju prosječnu duljinu sjene za pojedini mjesec. Nisu ucrtane duljine sjene za siječanj, veljaču, studeni i prosinac jer tada sjena prekriva čitavo visoko prizemlje.



Slika 7 Zasjenjenje visokog prizemlja od strane nebodera

4.2 Dozračena energija

4.2.1 Visoko prizemlje

Koristeći PVGIS program jednostavno se dolazi do podataka o mjesečnoj i godišnjoj dozračenoj sunčevoj energiji. Program sam predlaže optimalni kut inklinacije prema geografskom položaju odabrane lokacije te on za područje grada Zagreba iznosi 34°. S obzirom da je zgrada visokog prizemlja zasjenjena od strane nebodera potrebno je posebno odrediti mjesečnu ukupno i difuzno dozračenu energiju. Iako PVGIS daje podatak o ukupno dozračenoj energiji, također daje i omjer ukupno i difuzno dozračene energije pa se može jednostavno izračunati difuzno dozračena energija.

Tablica 4 Dozračena energija na krovu visokog prizemlja

Krovište visokog prizemlja		
Mjesec	Ukupno dozračena energija [kWh/m ²]	Difuzno dozračena energija [kWh/m ²]
Siječanj	52,4	34,1
Veljača	79,8	44,7
Ožujak	133	69,2
Travanj	156	70,2
Svibanj	178	74,8
Lipanj	181	74,2
Srpanj	194	71,8
Kolovoz	186	63,2
Rujan	141	63,5
Listopad	107	56,7
Studen	55,8	35,7
Prosinac	41,2	28

4.2.2 Neboder

Neboder južne zgrade FSB-a nije okružen visokim zgradama pa prima samo ukupno sunčevo zračenje, tj. nema zasjenjivanja. Površine koje su pogodne za postavljanje PV sustava su južno, istočno i zapadno pročelje te krovšte. Kut inklinacije za pročelja zgrade je 90° jer su one vertikalne. Nagibom redova modula pod nekim kutom između 0° i 90° moguće je povećati dozračenu energiju na sustav, ali tada treba voditi računa o potrebnom razmaku između redova zbog mogućeg međusobnog zasjenjivanja. Time se gubi efektivna površina sustava pa je odlučeno da se koristi sustav s vertikalno postavljenim modulima. Na južnoj stran efektivna je površina ograničena visinom razmaka između prozora pa je moguće primijeniti kut inklinacije između 0° i 90° bez da se smanji površina sustava, ali se time zasjenjuju sami prozori, odnosno smanjuje se prolaz svjetlosti u urede pa je odlučeno da se također koristi sustav s vertikalno postavljenim modulima.

Na krovštu nebodera PV moduli se mogu postaviti pod optimalnim kutem inklinacije od 34° .

Tablica 5 Dozračena energija na neboderu

Neboder			
Mjesec	Južno pročelje [kWh/m ²]	Bočne strane [kWh/m ²]	Krovšte [kWh/m ²]
Siječanj	52,5	21,9	52,3
Veljača	73,4	34,5	79,5
Ožujak	104	64,1	133
Travanj	97,8	79,2	156
Svibanj	90,3	95,9	178
Lipanj	82,4	97,1	181
Srpanj	91,4	101	194
Kolovoz	105	94,4	186
Rujan	102	67	141
Listopad	93,7	47,9	107
Studen	53,6	22,4	55,8
Prosinac	41,6	16,3	41,1

U Tablici 5 dano je ukupno zračenje za obje bočne strane, jer je njihov iznos jednak.

4.3 Odabir fotonaponskog modula

Iz kataloga distributera odabran je fotonaponski modul Yingli Panda 280W.



Slika 8 Fotonaponski modul Yingli Panda 280W [9]

Tehničke karakteristike [9]:

- P_{\max} : 280 Wp (maksimalna izlazna snaga)
- I_{sc} : 9,50 A
- U_{oc} : 39,1 V
- I_{mpp} : 8,96 A (struja kod P_{\max})
- U_{mpp} : 31,3 V (napon kod P_{\max})
- Efikasnost: 17,2%
- Maksimalni napon sustava: 1000 V
- Tolerancija izlazne snage: 0/+4,99 W
- Boja pozadine : bijela
- Boja okvira: srebrna
- Priključci: MC4/IP67
- Maksimalno opterećenje: vjetar - 2400 N/m²
snijeg - 5400 N/m²
- Dimenzije: 1650x990x40 mm
- Težina: 18,5 kg
- Jamstvo: 10 godina

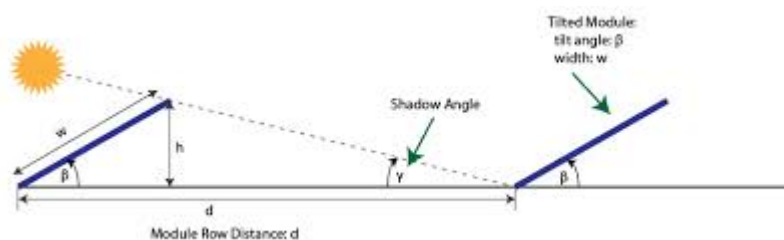
- Jamstvo efikasnosti: 92% nakon 10 godina, 82% maksimalne izlazne snage nakon 25 godina

Cijena: 1980,00 kn

4.4 Određivanje površine sustava

4.4.1 Visoko prizemlje

Kako bi odredili površinu dijela sustava koji se nalazi na krovu visokog prizemlja najprije se izračunava optimalni razmak između redova modula.



Slika 9 Optimalna udaljenost redova PV modula [10]

$$a_{RM} = l_{FNM} * \left(\frac{\sin \beta}{\tan \alpha_s} + \cos \beta \right) \quad [11] \quad (1)$$

Način izračunavanja optimalnog razmaka između redova modula prikazan je jednadžbom (1).

a_{RM} – međusobni razmak redova modula [11]

l_{FNM} – duljina modula [11]

β – nagib modula u odnosu na vodoravnu plohu [11]

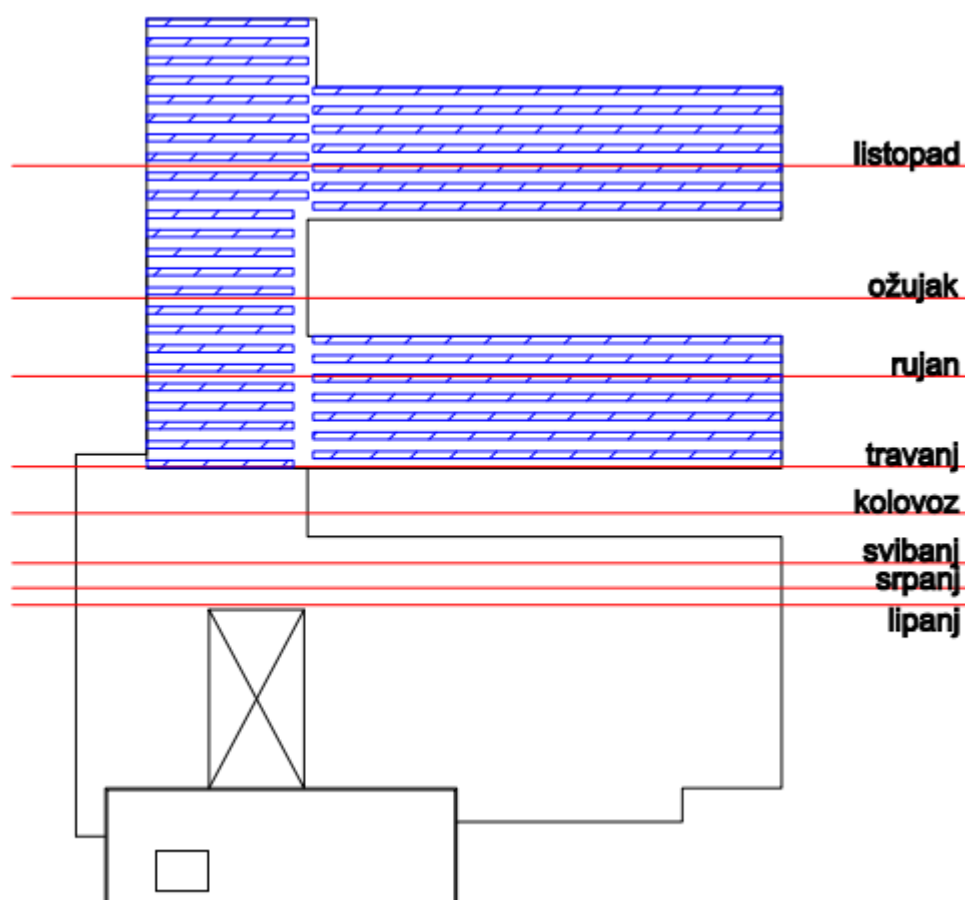
α_s – visina sunca [11]

S obzirom na zasjenjivanje krovišta visokog prizemlja, odabrana je visina sunca za travanj. Time se izbjegava međusobno zasjenjivanje redova modula od travnja do rujna, odnosno kroz cijeli period u kojem nema utjecaja zasjenjavanja od strane nebodera. Upadni kut sunčevog zračenja za grad Zagreb u travnju iznosi $\alpha = 22,4^\circ$ [11], kut inklinacije iznosi $\beta = 34^\circ$ dok je duljina modula $l_{\text{FNM}} = 0,99$ metara.

$$a_{RM} = 0,99 * \left(\frac{\sin(34)}{\tan(22,4)} + \cos(34) \right)$$

$$a_{RM} = 2,16 \text{ m}$$

Korištenjem tlocrta južne zgrade FSB-a, dimenzija PV modula te optimalnog razmaka između redova modula, izrađena je skica koja prikazuje dio PV sustava koji se nalazi na krovištu visokog prizemlja.



Slika 10 Krovište visokog prizemlja s PV modulima i zasjenjivanjem

Dijelovi krovišta omeđeni plavim linijama i šrafurom predstavljaju redove PV modula. Crvene linije koje predstavljaju duljinu sjene nebodera za pojedini mjesec ucrtane su i na ovoj skici kako bi se lakše odredile površine koje su ozračene ukupnim zračenjem i površine koje su ozračene difuznim zračenjem tijekom godine.

Korištenjem Slike 10 izračunate su površine koje su ozračene ukupnom, odnosno difuznom dozračenom energijom tijekom pojedinih mjeseci, a rezultati su prikazani

Ukupno se na krovištu visokog prizemlja na ovaj način može postaviti 698 PV modula.

Tablica 6 Ozračena površina na krovištu visokog prizemlja

Krovište visokog prizemlja		
Mjesec	Površina ozračena izravno i difuzno [m ²]	Samo difuzno ozračena površina [m ²]
Siječanj	0	1140,24
Veljača	0	1140,24
Ožujak	627,29	512,95
Travanj	1138,42	1,82
Svibanj	1140,24	0
Lipanj	1140,24	0
Srpanj	1140,24	0
Kolovoz	1140,24	0
Rujan	807,75	332,49
Listopad	362,34	777,9
Studeni	0	1140,24
Prosinac	0	1140,24

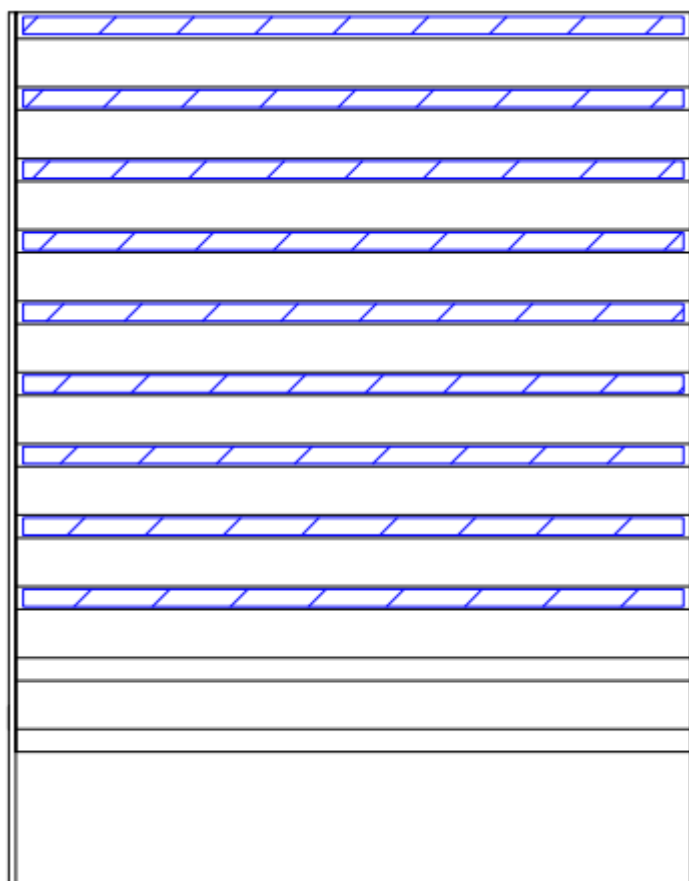
4.4.2 Neboder

Kako bi se izbjeglo moguće zasjenjenje od strane okolnog drveća, odlučeno je da se dio PV sustava na neboderu ne postavlja do visine trećeg kata.

4.4.2.1 Južno pročelje

Korištenjem podataka o dimenzijama PV modula i dimenzijama nebodera, odnosno njegove visine i širine te visine prozora i razmaka između njih, izračunata je efektivna površina koja se može iskoristiti za postavljanje PV modula na južno pročelje nebodera. Ona iznosi 338, 13 m² što odgovara broju od 207 PV modula.

Raspored PV modula na južnom pročelju nebodera prikazan je Slikom 11.



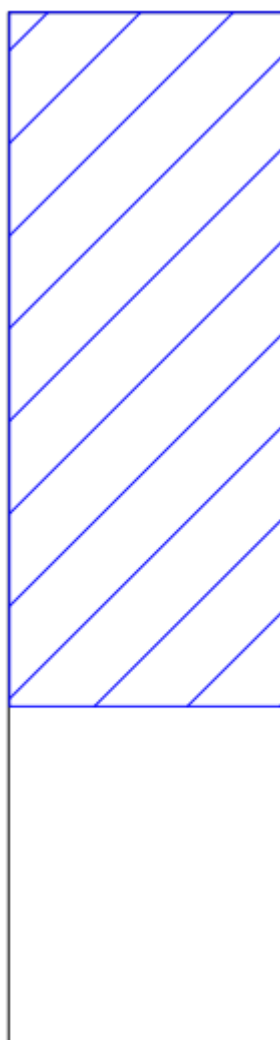
Slika 11 Južno pročelje nebodera s PV modulima

Površina omeđena plavim linijama i šrafurom predstavlja PV module.

4.4.2.3 Istočno i zapadno pročelje

Koristeći podatke o dimenzijama PV modula i nebodera izračunata je efektivna površina koja se može iskoristiti za postavljanje PV modula na bočna pročelja nebodera. Ona ukupno, za istočnu i zapadnu stranu, iznosi 888,62 m² što odgovara broju od 544 PV modula.

Raspored PV modula na bočnim pročeljima nebodera prikazan je Slikom 12.



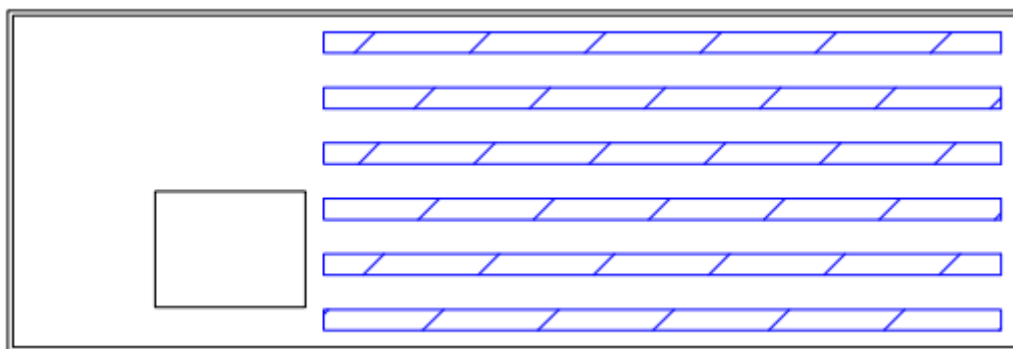
Slika 12 Bočno pročelje nebodera s PV modulima

Površina omeđena plavim linijama i šrafurom predstavlja PV module.

4.4.2.4 Krovšte nebodera

Korištenjem podataka o dimenzijama PV modula i nebodera izračunata je efektivna površina koja se može iskoristiti za postavljanje PV modula na krovšte nebodera. Ona iznosi 156,82 m² što odgovara broju od 96 PV modula.

Raspored PV modula na krovštu nebodera prikazan je Slikom 13.



Slika 13 Krovšte nebodera s PV modulima

Površina omeđena plavim linijama i šrafurom predstavlja PV module.

4.5 Odabir ostale opreme PV sustava

4.5.1 Nosači PV modula za ravni krov

Za nosivi elemnt PV modula koji se nalaze na krovovima visokog prizemlja i nebodera odabran je SOLE SL-FRT-SL-3.



Slika 14 Nosač PV modula SOLE SL-FRT-SL-3 [12]

Kut inklinacije može se podesiti između 30° i 60° , a proizvođač izrađuje nosač dimenzija koje odgovaraju zahtjevu kupca [12].

Cijena: 299,00 kn [12]

4.5.2 Nosač PV modula za pročelje

Nosači PV modula za pročelja zgrada uz kut inklinacije od 90° nisu često traženi, te nema informacija o njihovoj cijeni, tj. distributeri ih ne nude u svojim katalozim. Kako se oni sastoje od gotovo iste opreme kao i nosači za ravni krov pretpostavlja se da njihova cijena iznosi 300,00 kn.

4.5.3 Pretvarač DC/AC

Odabran je pretvarač Aurora TRIO-27.6-TL. Nazivna izlazna snaga uređaja iznosi 26,7 kW [13].

Cijena: 24 900,00 kn [14]



Slika 15 Pretvarač Aurora TRIO-27.6-TL [13]

4.5.4 Preostala oprema i radovi

U preostalu opremu sustava spadaju kablovi, konektori, spojna kutija sa zaštitnom opremom te brojilo isporučene i preuzete električne energije. Cijenu tih komponenata za PV sustav je teško odrediti pa će se ona zajedno s cijenom izvođenja radova pretpostaviti. Pretpostavka je temeljna na ponudama distributera koji za određenu snagu PV sustava predlažu cijenu u koju je uključena sva oprema te izvođenje radova. Analizom tih cijena zaključuje se da cijena preostale opreme te izvođenja radova iznosi 50% cijene opreme u koju nisu uključeni PV moduli.

4.6 Proizvodnja električne energije

Koristeći podatke iz poglavlja 4.2 Dozračena energija te 4.4 Određivanje površine sustava izračunava se ukupna mjesečna i godišnja dozračena energija na PV sustav.

Tablica 7 Ukupna dozračena energija na sustav

Ukupna dozračena sunčeva energija na sustav					
Mjesec	Krovište visokog prizemlja [kWh]	Krovište nebodera [kWh]	Južno pročelje nebodera [kWh]	Bočna pročelja nebodera [kWh]	Ukupno [kWh]
Siječanj	38882,18	8201,686	17751,825	19460,778	84296,47
Veljača	50968,73	12467,19	24818,742	30657,39	118912,05
Ožujak	118925,71	20857,06	35165,52	56960,542	231908,83
Travanj	177721,28	24463,92	33069,114	70378,704	305633,02
Svibanj	202962,72	27913,96	30533,139	85218,658	346628,48
Lipanj	206383,44	28384,42	27861,912	86285,002	348914,77
Srpanj	221206,56	30423,08	30905,082	89750,62	372285,34
Kolovoz	212084,64	29168,52	35503,65	83885,728	360642,54
Rujan	135005,87	22111,62	34489,26	59537,54	251144,29
Listopad	82877,31	16779,74	31682,781	42564,898	173904,73
Studen	40706,57	8750,556	18123,768	19905,088	87485,98
Prosinac	31926,72	6445,302	14066,208	14484,506	66922,74

Kako bi se izračunala proizvedena električna energija sustava potrebno je dozračenu energiju pomnožiti s faktorima iskoristivosti PV modula te ostalih komponenata sustava. Podatak o faktoru iskoristivosti modula očitava se iz tehničkih karakteristika odabranog modula, dok je faktor iskoristivosti ostalih komponenata sustava pretpostavljen. On obično iznosi između 86% i 90% pa je odabrana vrijednost od 88%.

Tablica 8 Mjesečna proizvodnja električne energije

Mjesec	Ukupna dozračena energija [kWh]	Iskoristivost modula	Iskoristivost ostalih dijelova sustava	Proizvedena električna energija [kWh]
Siječanj	84296,47	0,172	0,88	12759,11
Veljača	118912,05	0,172	0,88	17998,53
Ožujak	231908,83	0,172	0,88	35101,72
Travanj	305633,02	0,172	0,88	46260,61
Svibanj	346628,48	0,172	0,88	52465,69
Lipanj	348914,77	0,172	0,88	52811,74
Srpanj	372285,34	0,172	0,88	56349,11
Kolovoz	360642,54	0,172	0,88	54586,85
Rujan	251144,29	0,172	0,88	38013,20
Listopad	173904,73	0,172	0,88	26322,22
Studeni	87485,98	0,172	0,88	13241,88
Prosinac	66922,74	0,172	0,88	10129,43

U Tablici 8 dani su podaci o mjesečnoj proizvodnji električne energije za prvu godinu rada. Tijekom godina proizvodnja se mijenja zbog pada iskoristivosti sustava. Održavanjem i servisiranjem može se zadržati stalna iskoristivost svih dijelova sustava osim PV modula. Kako proizvođač u tehničkim karakteristikama daje garantirane vrijednosti faktora iskoristivosti nakon 10, odnosno 25 godina, interpolacijom je određeno kako će se on mijenjati kroz period od 20 godina. Interpolacija je provedena uz pretpostavku da se faktor iskoristivosti smanjuje linearno. Time je za svaku godinu moguće izračunati proizvodnju električne energije uzevši u obzir pad iskoristivosti PV modula. Tablice s točnom mjesečnom proizvodnjom u svih 20 godina nalaze se u prilogu.

U Tablici 9 prikazana je promjena faktora iskoristivosti PV modula.

Tablica 9 Faktor iskoristivosti PV modula

Godina	Faktor Iskoristivosti PV modula	Godina	Faktor Iskoristivosti PV modula
1	0,172	11	0,157
2	0,17	12	0,156
3	0,169	13	0,155
4	0,167	14	0,153
5	0,166	15	0,152
6	0,164	16	0,151
7	0,163	17	0,15
8	0,161	18	0,149
9	0,16	19	0,148
10	0,158	20	0,147

Godišnja proizvodnja električne energije PV sustava prikazana je Tablicom 10.

Tablica 10 Godišnja proizvodnja električne energije

Godina	Proizvodnja električne energije [kWh]	Godina	Proizvodnja električne energije [kWh]
1	416040,09	11	379757,52
2	411202,41	12	377338,69
3	408783,58	13	374919,85
4	403945,90	14	370082,17
5	401527,06	15	367663,34
6	396689,39	16	365244,50
7	394344,73	17	362825,66
8	389432,87	18	360406,82
9	387014,04	19	357987,98
10	382176,36	20	355569,15

4.7 Ekonomski plan

4.7.1 Proizvodna cijena električne energije

Proizvodna cijena električne energije (LCOE) je ekonomska procjena ukupnih troškova izgradnje i održavanja sustava tijekom njegova radnog vijeka podijeljenih s ukupnom proizvedenom električnom energijom tijekom radnog vijeka [15]. Za proizvodnu cijenu električne energije može se reći da je to ona cijena po kojoj se prodaje proizvedena električna energija uz koju će se sustav isplatiti u svom radnom vijeku trajanja [15].

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad [15] \quad (2)$$

gore jednačba prikazuje način izračunavanja proizvodne cijene električne energije.

LCOE – proizvodna cijena električne energije (levelised cost of electricity) [15]

I_t – investicijski troškovi u vremenskom periodu t [15]

M_t – troškovi održavanja u vremenskom periodu t [15]

F_t – troškovi goriva u vremenskom periodu t [15]

E_t – proizvedena električna energija u vremenskom periodu t [15]

r – diskontna stopa [15]

n – radni vijek trajanja sustava [15]

Kako PV sustav ne troši nikakvo gorivo, troškovi goriva za ovaj proračun ne postoje.

Investicijski troškovi jednaki su zbroju ukupne cijene opreme sustava te cijene izvođenja radova.

Tablica 11 Cijena opreme i izvođenja radova

Cijena opreme i radova			
Oprema	Cijena [kn]	Količina	Ukupna cijena [kn]
PV modul	1980,00	1545	3059100,00
Pretvarač DC/AC	24900,00	16	398400,00
Nosač za ravni krov	299,00	794	237406,00
Zidni nosač	300,00	751	225300,00
Preostala oprema i radovi	430553,00	1	430553,00

$$I_t = 3059100,00 + 398400,00 + 237406,00 + 225300,00 + 430553,00$$

$$I_t = 4350759,00 \text{ kn}$$

Godišnji troškovi održavanja procijenjeni su na vrijednost od 1,5% investicijskih troškova.

$$M_t = 1,5\% \cdot t \cdot I_t$$

$$M_t = 1,5\% \cdot 20 \cdot 4350759,00$$

$$M_t = 1305227,7 \text{ kn}$$

Proizvedena električna energija jednaka je zbroju proizvedene električne energije za svaku godinu. Vrijednosti godišnjih proizvodnji električne energije prikazane su u Tablici 10.

$$E_t = 7668070,59 \text{ kWh}$$

Diskontna stopa kod računanja proizvodne cijene električne energije jednaka je kamatnoj stopi. Kao referenta vrijednost kamatne stope uzeta je prosječna kamatna stopa Europske investicijske banke (EIB) za 2014. godinu te ona iznosi 2,66% [16].

$$\text{LCOE} = \frac{4350759 + 1002161,4}{5926486,88}$$

$$\text{LCOE} = 0,90 \text{ kn/kWh}$$

Ako se 40% projekta financira iz Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, smanjuje se vrijednost LCOE jer se u tom slučaju kao investicijski trošak uzima samo preostalih 60% početne investicije. Proizvodna cijena električne energije u tom slučaju iznosi:

$$\text{LCOE} = 0,61 \text{ kn/kWh}$$

4.7.2. Zajamčena otkupna cijena električne energije

Kako bi se ostvarilo pravo na otkup viška proizvedene električne potrebno je zadovoljiti nekoliko uvjeta propisanih Zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji [17]. Jedan od uvjeta je da ukupna instalirana snaga postrojenja ne prelazi 500 kW [17]. Kako se ovaj sustav sastoji od 1545 PV modula nazivne snage 280 W, njegova je ukupna instalirana snaga 432,6 kW te je taj uvjet ispunjen. Uz pretpostavku da su ispunjeni i ostali uvjeti može se izračunati otkupna cijena proizvedene električne energije prema formuli:

$$C_i = 0,9 * PKC_i; \quad E_{pi} \geq E_{ii} \text{ [17]} \quad (3)$$

$$C_i = 0,9 * PKC_i * E_{pi} / E_{ii}; \quad E_{pi} < E_{ii} \text{ [17]} \quad (4)$$

E_{pi} – ukupna električna energija preuzeta iz mreže unutar obračunskog razdoblja i [kWh] [17]

E_{ii} – ukupna električna energija isporučena u mrežu unutar obračunskog razdoblja i [kWh] [17]

C_i – otkupna cijena proizvedene električne energije u obračunskom razdoblju i [kn/kWh] [17]

PKC_i – prosječna cijena električne energije preuzete iz mreže, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja i [kn/kWh] [17]

Račun za preuzetu električnu energiju umanjuje se za iznos isporučene električne energije po cijeni C_i [17]. Obračunsko razdoblje i iznosi jedan mjesec [17].

S obzirom da će se električna energija isporučivati u mrežu samo one mjesece kada je proizvodnja veća od potrošnje potrebno je odrediti koji su to mjeseci. U Tablici 8 dani su podaci o mjesečnoj proizvodnji električne energije za prvu godinu rada sustava. Od tih je vrijednosti potrebno oduzeti vrijednosti ukupne potrošnje električne energije prikazane u Tablici 2.

Tablica 12 Razlika proizvodnje i potrošnje električne energije

Mjesec	Proizvodnja [kWh]	Potrošnja [kWh]	Razlika [kWh]
Siječanj	12759,11	91347	-78587,89
Veljača	17998,53	91429	-73430,47
Ožujak	35101,72	93276	-58174,28
Travanj	46260,61	85973	-39712,39
Svibanj	52465,69	83945	-31479,31
Lipanj	52811,74	73448	-20636,26
Srpanj	56349,11	69031	-12681,89
Kolovoz	54586,85	48603	5983,85
Rujan	38013,20	67298	-29284,80
Listopad	26322,22	82773	-56450,78
Studeni	13241,88	86699	-73457,12
Prosinac	10129,43	82687	-72557,57

Iz Tablice 12 je vidljivo kako je kolovoz jedini mjesec u kojem je proizvodnja veća od potrošnje. S obzirom da je proizvodnja najveća upravo u prvoj godini rada sustava, a potrošnja se pretpostavlja konstantnom za svaku godinu, može se zaključiti da će i u sljedećim godinama kolovoz biti jedini mjesec tijekom kojeg će postojati višak proizvedene električne energije.

U Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji postoji uvjet kako se proizvedena električna energija isporučuje preko istog obračunskog mjernog mjesta preko kojeg se vrši preuzimanje električne energije [17], no nije definirano kakav sustav brojila je potrebno koristiti. Kako je moguće napraviti sustav s dva brojila, jedan za isporučenu i jedan za preuzetu električnu energiju, te sustav s jednim dvosmjernim brojiлом, koje obračunava

razliku između isporučene i preuzete električne energije te višak predaje u elektroenergetsku mrežu, potrebno je izračunati zajamčenu otkupnu cijenu električne energije za oba sustava.

Za sustav s dva brojila PKC_i se dobiva iz Tablice 1 i Tablice 2 prema formuli:

$$PKC_i = C_{VTi} * U_{VTi} + C_{NTi} * U_{NTi}$$

C_{VTi} – cijena preuzete električne energije u visokoj tarifi u obračunskom razdoblju i [kn]

U_{VTi} – udio preuzete električne energije u visokoj tarifi u vremenskom razdoblju i

C_{NTi} – cijena preuzete električne energije u niskoj tarifi u obračunskom razdoblju i [kn]

U_{NTi} – udio preuzete električne energije u niskoj tarifi u obračunskom razdoblju i

Tablica 13 Zajamčena otkupna cijena električne energije sustava s dva brojila

Mjesec	Udio potrošnje u visokoj tarifi	Udio potrošnje u niskoj tarifi	PKC_i [kn/kWh]	C_i [kn/kWh]
Siječanj	0,70	0,30	0,58	0,52
Veljača	0,70	0,30	0,58	0,52
Ožujak	0,70	0,30	0,58	0,52
Travanj	0,68	0,32	0,57	0,52
Svibanj	0,71	0,29	0,58	0,52
Lipanj	0,69	0,31	0,58	0,52
Srpanj	0,68	0,32	0,57	0,52
Kolovoz	0,62	0,38	0,56	0,45
Rujan	0,68	0,32	0,57	0,52
Listopad	0,71	0,29	0,58	0,52
Studeni	0,72	0,28	0,58	0,53
Prosinac	0,68	0,32	0,57	0,52

U svim mjesecima C_i se računa prema jednadžbi (3), osim u kolovozu kada je količina isporučene električne energije veća od preuzete pa se C_i računa prema jednadžbi (4).

U Tablici 13 prikazana je vrijednost C_i za prvu godinu rada sustava. Kako se proizvodnja električne energije mijenja, odnosno pada svake godine, mijenjat će se i vrijednost C_i u kolovozu.

Tablica 14 Godišnja promjena C_i sustava s dva brojila

Godina	Proizvodnja [kWh]	C_i [kn/kWh]
1	54586,85	0,45
2	53952,12	0,45
3	53634,76	0,46
4	53000,03	0,46
5	52682,66	0,46
6	52047,93	0,47
7	51730,57	0,47
8	51095,84	0,48
9	50778,47	0,48
10	50143,74	0,49
11	49826,37	0,49
12	49509,01	0,49
13	49191,64	0,50

Nakon trinaest godina rada sustava proizvedena električna energija u kolovozu postaje manja od preuzete pa vrijednost C_i postaje konstanta i računa se prema jednadžbi (3) te iznosi $C_i = 0,50$ kn/kWh.

Za sustave s dvosmjernim brojilom nema potrebe računati zajamčenu otkupnu cijenu za svaki mjesec jer se računi ne umanjuju za C_i , već za onu vrijednost kojom bi električna energija bila bila plaćena da ne postoji vlastita proizvodnja. Kako PV sustav može proizvoditi električnu energiju samo tokom dana kada se obračunava visoka tarifa električne energije, ušteda ostvarena ovakvim sustavom jednaka je cijeni visoke tarife crvenog tarifnog modela i iznosi 0,91 kn/kWh. Za mjesec u kojima je količina isporučene električne energije veća od preuzete, vrijednost PKC_i je jednaka cijeni niske tarife crvenog tarifnog modela umanjenoj za naknadu za korištenje mreže, jer se električna energija preuzima samo noću kada nema proizvodnje sustava, te ona iznosi 0,39 kn/kWh. Električna energija isporučena u mrežu jednaka je razlici proizvedene električne energije i potrošene električne energije u visokoj tarifi.

$$E_{ii} = P_i - VT_i$$

P_i – proizvedena električna energija u obračunskom razdoblju i [kWh]

VT_i – preuzeta električne energije u visotoj tarifi u obračunskom razdoblju i [kWh]

$$E_{ii} = 54586,85 - 30344$$

$$E_{ii} = 24242,85 \text{ kWh}$$

Električna energija preuzeta iz mreže jednaka je potrošnji električne energije u nižoj tarifi.

$$E_{pi} = 18259 \text{ kWh}$$

Prema jednadžbi (4), zajamčena otkupna cijena električne energije ovakvog sustava za mjesec kolovoz iznosi $C_i = 0,26$ kn. Ova se cijena odnosi na mjesec kolovoz za prvu godinu rada sustava, a vrijednosti zajamčene otkupne cijene električne energije po godinama prikazane su Tablicom 15. Nakon trinaest godina količina isporučene električne energije postaje manja od preuzete te se zajamčena otkupna cijena električne energije izračunava prema jednadžbi (3) i iznosi $C_i = 0,35$ kn/kWh

Tablica 15 Godišnja promjena C_i sustava s dvosmjernim brojilom za kolovoz

Kolovoz				
Godina	Proizvodnja [kWh]	Isporučeno [kWh]	Preuzeto [kWh]	C_i [kn/kWh]
1	54586,85	24242,85	18259	0,26
2	53952,12	23608,12	18259	0,27
3	53634,76	23290,76	18259	0,28
4	53000,03	22656,03	18259	0,28
5	52682,66	22338,66	18259	0,29
6	52047,93	21703,93	18259	0,30
7	51730,57	21386,57	18259	0,30
8	51095,84	20751,84	18259	0,31
9	50778,47	20434,47	18259	0,31
10	50143,74	19799,74	18259	0,32
11	49826,37	19482,37	18259	0,33
12	49509,01	19165,01	18259	0,33
13	49191,64	18847,64	18259	0,34

Kako se za ovakav sustav ušteda odnosi samo na preuzetu električnu energiju u visokoj tarifi, osim kolovoza višak električne energije također će postojati u lipnju i srpnju. Za te mjesece količina isporučene električne energije uvijek je manja od preuzete pa se višak električne energije isporučuje po cijeni $C_i = 0,35$ kn/kWh. Za lipanj višak postoji samo u prvih pet godina rada, dok za srpanj i kolovoz višak postoji u svih 20 godina rada sustava. Godišnja zarada od isporučene električne energije prikazana je Tablicom 16.

Tablica 16 Godišnja zarada sustava s dvosmjernim brojilom

Godina	Lipanj [kn]	Srpanj [kn]	Kolovoz [kn]	Ukupno [kn]
1	667,71	3357,59	6408,91	10434,21
2	452,78	3128,26	6408,91	9989,95
3	345,31	3013,60	6408,91	9767,82
4	130,38	2784,27	6408,91	9323,56
5	22,91	2669,60	6408,91	9101,43
6	0,00	2440,28	6408,91	8849,19
7	0,00	2325,61	6408,91	8734,52
8	0,00	2096,29	6408,91	8505,19
9	0,00	1981,62	6408,91	8390,53
10	0,00	1752,29	6408,91	8161,20
11	0,00	1637,63	6408,91	8046,54
12	0,00	1522,97	6408,91	7931,88
13	0,00	1408,30	6408,91	7817,21
14	0,00	1178,97	6374,52	7553,49
15	0,00	1064,31	6263,44	7327,75
16	0,00	949,65	6152,36	7102,01
17	0,00	834,98	6041,29	6876,27
18	0,00	720,32	5930,21	6650,53
19	0,00	605,65	5819,13	6424,78
20	0,00	490,99	5708,05	6199,04

4.7.3 Procjena isplativosti izgradnje sustava

Kako bi se procijenilo da li je ovakav sustav isplativ ili ne potrebno je napraviti ekonomski novčani tok te pomoću njega izračunati internu stopu rentabilnosti (IRR).

Interna stopa rentabilnosti je povrat zarađen na danom projektu [18]. To je diskontna stopa pri kojoj je razlika između neto sadašnje vrijednosti priljeva i odljeva jednaka nuli [18].

Diskontna stopa je mjera vremenske vrijednosti novca, odnosno svođenja budućih novčanih iznosa ili primitaka na sadašnju vrijednost [19]. Općenito, diskontna stopa je kamatna stopa koju središnja banka obračunava pri otkupu mjenica [19].

Neto sadašnja vrijednost investicijskog projekta je razlika između sadašnje vrijednosti budućeg prihoda od projekta i sadašnje vrijednosti njegovih budućih troškova [20].

Za ekonomski tok novca potrebno je odrediti prihode, odnosno rashode.

Godišnji prihod ovog sustava predstavlja ušteda koja je ostvarena umanjjenjem računa za električnu energiju preuzetu iz mreže te zarada od električne energije isporučene u mrežu. Za obje moguće izvedbe sustava izračunati su mjesečni prihodi za svih 20 godina. Zbrajanjem mjesečnih prihoda dobiva se godišnji prihod. Tablice s mjesečnim i godišnjim prihodima nalaze se u prilogu.

Rashod sustava predstavljaju cijena ukupne investicije te cijena godišnjeg održavanja sustava.

Ulazni podaci za ekonomski novčani tok:

- Ukupno početno ulaganje : 4350759,00 kn
- Godišnje održavanje (1,5% ukupnog početnog ulaganja): 65261,39 kn
- Godišnja amortizacija: 435075,9 kn
- Trajanje amortizacije: 10 godina
- Vijek trajanja sustava: 20 godina
- Diskontna stopa: 5%

Amortizacija je postupno umanjivanje vrijednosti imovine poduzeća [21]. Iako ona u ovoj analizi nema utjecaj na isplativost projekta navedena je jer se upisuje kao knjigovodstveni trošak. Korištena je linearna amortizacija što znači da je iznos godišnje amortizacije uvijek jednak, a dobiva se dijeljenjem ukupnog početnog ulaganja s trajanjem amortizacije.

Kako se prihodi sustava razlikuju ovisno o tome koriste li se dva brojila ili jedno dvosmjerno brojilo, potrebno je napraviti ekonomski novčani tok za obje moguće izvedbe sustava.

Tablica 17 Novčani tok sustava s dva brojila

Ekonomski novčani tok					
Godina	Prihod [kn]	Rashod [kn]	Amortizacija [kn]	Dobit [kn]	Neto sadašnja vrijednost [kn]
0	0,00	4350759,00	0,00	-4350759,00	-4350759,00
1	212307,90	65261,39	435075,90	147046,52	140044,30
2	209839,21	65261,39	435075,90	144577,82	131136,34
3	209141,21	65261,39	435075,90	143879,82	124288,80
4	206666,16	65261,39	435075,90	141404,78	116334,06
5	205428,64	65261,39	435075,90	140167,26	109824,71
6	203474,08	65261,39	435075,90	138212,69	103136,44
7	177959,16	65261,39	435075,90	112697,77	80092,20
8	200262,94	65261,39	435075,90	135001,56	91374,37
9	199019,08	65261,39	435075,90	133757,69	86221,40
10	172462,83	65261,39	435075,90	107201,45	65812,39
11	195785,73	65261,39	0,00	130524,35	76314,88
12	194538,69	65261,39	0,00	129277,31	71986,44
13	193916,90	65261,39	0,00	128655,52	68228,77
14	191414,75	65261,39	0,00	126153,37	63716,02
15	190163,67	65261,39	0,00	124902,29	60080,14
16	188912,60	65261,39	0,00	123651,21	56646,05
17	187661,52	65261,39	0,00	122400,14	53402,77
18	186410,44	65261,39	0,00	121149,06	50339,94
19	185159,37	65261,39	0,00	119897,98	47447,70
20	183908,29	65261,39	0,00	118646,91	44716,77
Ukupno					-2709614,50

Korištenjem funkcije za izračunavanje interne stope rentabilnosti u Microsoft Office Excel-u dobiva se vrijednost:

$$IRR = -4,63\%$$

Da bi projekt bio isplativ interna stopa rentabilnosti mora biti veća od diskontne stope, što znači za izgradnja ovakvog PV sustava na južnoj zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje nije isplativa

Tablica 18 Novčani tok sustava s dvosmjernim brojiлом

Ekonomski novčani tok					
Godina	Prihod [kn]	Rashod [kn]	Amortizacija [kn]	Dobit [kn]	Neto sadašnja vrijednost [kn]
0	0,00	4350759,00	0,00	-4350759,00	-4350759,00
1	356503,92	65261,39	435075,90	291242,53	277373,84
2	353390,05	65261,39	435075,90	288128,67	261341,20
3	351833,12	65261,39	435075,90	286571,74	247551,44
4	348719,26	65261,39	435075,90	283457,87	233201,49
5	347162,32	65261,39	435075,90	281900,94	220876,76
6	344240,48	65261,39	435075,90	278979,09	208178,49
7	342079,86	65261,39	435075,90	276818,47	196729,72
8	338554,60	65261,39	435075,90	273293,21	184975,60
9	336825,72	65261,39	435075,90	271564,34	175052,79
10	333367,97	65261,39	435075,90	268106,58	164594,18
11	331639,09	65261,39	0,00	266377,70	155745,53
12	329910,21	65261,39	0,00	264648,83	147366,37
13	328181,33	65261,39	0,00	262919,95	139432,06
14	324689,19	65261,39	0,00	259427,80	131028,67
15	322849,23	65261,39	0,00	257587,85	123904,16
16	321009,28	65261,39	0,00	255747,89	117161,06
17	319169,32	65261,39	0,00	253907,94	110779,19
18	317329,37	65261,39	0,00	252067,98	104739,45
19	315489,41	65261,39	0,00	250228,03	99023,73
20	313649,45	65261,39	0,00	248388,07	93614,85
Ukupno					-958088,42

Za sustav s dvosmjernim brojiлом interna stopa rentabilnosti iznosi:

$$IRR = 2,16\%$$

Kako je to još uvijek manje od diskontne stope, koja iznosi 5%, izgradnja ovakvog sustava također nije isplativa.

Oba prikazana novčana toka pretpostavljaju da se sav novac potreban za izgradnju sustava dobiva iz kredita. Ako bi se određeni dio ukupne početne investicije sufinancirao iz Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, sustav s dvosmjernim brojiлом mogao bi postati isplativ. Napravljen je još jedan novčani tok za slučaj da je 40% ukupne početne investicije financirano iz Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost.

Tablica 19 Novčani tok sustava s dvosmjernim brojiom i sufinanciranjem

Ekonomski novčani tok					
Godina	Prihod [kn]	Rashod [kn]	Amortizacija [kn]	Dobit [kn]	Neto sadašnja vrijednost [kn]
0	0,00	2610455,40	0,00	-2610455,40	-2610455,40
1	356503,92	65261,39	435075,90	291242,53	277373,84
2	353390,05	65261,39	435075,90	288128,67	261341,20
3	351833,12	65261,39	435075,90	286571,74	247551,44
4	348719,26	65261,39	435075,90	283457,87	233201,49
5	347162,32	65261,39	435075,90	281900,94	220876,76
6	344240,48	65261,39	435075,90	278979,09	208178,49
7	342079,86	65261,39	435075,90	276818,47	196729,72
8	338554,60	65261,39	435075,90	273293,21	184975,60
9	336825,72	65261,39	435075,90	271564,34	175052,79
10	333367,97	65261,39	435075,90	268106,58	164594,18
11	331639,09	65261,39	0,00	266377,70	155745,53
12	329910,21	65261,39	0,00	264648,83	147366,37
13	328181,33	65261,39	0,00	262919,95	139432,06
14	324689,19	65261,39	0,00	259427,80	131028,67
15	322849,23	65261,39	0,00	257587,85	123904,16
16	321009,28	65261,39	0,00	255747,89	117161,06
17	319169,32	65261,39	0,00	253907,94	110779,19
18	317329,37	65261,39	0,00	252067,98	104739,45
19	315489,41	65261,39	0,00	250228,03	99023,73
20	313649,45	65261,39	0,00	248388,07	93614,85
Ukupno					782215,18

Uz 40% sufinanciranja iz Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost interna stopa reverzibilnosti sustava s dvosmjernim brojiom iznosi:

$$IRR = 8,43\%$$

Kako je u ovom slučaju IRR veći od diskontne stope, sustav izveden i financiran na ovakav način bio bi isplativ.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog zadatka bio je provesti procjenu isplativosti izgradnje fotonaponskog sustava na južnoj zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje. U tu svrhu napravljen je koncept PV sustava koji se može izgraditi na južnoj zgradi te je izrađen novčani tok za spomenuti sustav.

Razmjena električne energije između PV sustava i elektroenergetskog sustava može se izvršiti na dva načina. Prvi način je sustav s dva brojila, jedno za isporučenu i jedno za preuzetu električnu energiju, a drugi način je sustav s dvosmjernim brojiлом koje prikazuje razliku između isporučene i preuzete električne energije.

Novčani tok za sustav s dva brojila pokazuje kako je interna stopa revezibilnosti vrlo niska u odnosu na diskontnu stopu te takav sustav nikako ne može biti isplativ. Za sustav s dvosmjernim brojiлом novčani tok pokazuje kako ni takav sustav nije isplativ, ali ima potencijal postati isplativ ako se dio početne investicije financira iz Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost. Iz tog razloga izrađen je novčani tok sustava s dvosmjernim brojiлом za koji je određeni dio početne investicije financiran iz spomenutog fonda. Taj novčani tok daje vrijednost interne stope reverzibilnosti koja je veća od diskontne stope što znači da je izgradnja sustava isplativa.

Iz ovoga se zaključuje da bi u slučaju odobravanja sredstava za izgradnju PV sustava iz Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost trebalo provesti ovakav projekt, tim više što se Fakultet strojarstva i brodogradnje nameće kao institucija koja treba promicati proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

Prije ulaženja u bilo kakav projekt izgradnje sustava potrebno je napraviti analizu isplativosti izgradnje dijela sustava koji se nalazi na bočnim pročeljima nebodera s obzirom da on predstavlja veliko financijsko opterećenje na početnu investiciju dok je njegova proizvodnja značajno manja u odnosu na ostale dijelove sustava.

6. PRILOZI

I. CD-R disk

7.LITERATURA

- [1] Freidrich Sick, Thomas Erge: PHOTOVOLTAICS IN BUILDINGS, A Design Handbook for Architects and Engineers, Fraunhofer Institute fot Solar Energy Systems, Freiburg
- [2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponski_sustavi
- [3] <http://breakingenergy.com/2015/05/11/thin-film-solar-cell-industry-in-transition-knockout-phase-is-over-profitability-and-vertical-integration-next/>
- [4] <http://physics.weber.edu/palen/Clearinghouse/labs/Skywatch/CelestialNavigation1.htm>
- [5] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- [6] <http://www.hep.hr/ods/kupci/poduzetnistvo.aspx>.
- [7] <http://www.findmyshadow.com/>
- [8] <http://planetcalc.com/1875/>
- [9] <http://www.solarno.hr/katalog/proizvod/YINGLI-280/yingli-panda-280w-172-efikasnost-novo>
- [10] <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/performance/shading.php>
- [11] Boris Labudović, Osnove primjene fotonaposnkih sustava, Zagreb, 2011.
- [12] <http://www.solarno.hr/Files/Sole%20Solarni-paneli%20nosa%C4%8Di%20cjenik%20II.pdf>
- [13] http://www.thepowerstore.com/datasheets/PowerOne/trio-20.0_27.6-tl-us.pdf
- [14] <http://www.solarni-paneli.hr/pdf/cjenik.pdf>
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source
- [16] <http://www.eib.org/attachments/general/reports/fr2014en.pdf>.
- [17] <http://www.zakon.hr/z/827/Zakon-o-obnovljivim-izvorima-energije-i-visokou%C4%8Dinkovitoj-kogeneraciji>
- [18] <http://www.moj-bankar.hr/Kazalo/I/Interna-stopa-rentabilnosti>

[19] <http://limun.hr/main.aspx?id=10399&Page=3>

[20] <http://www.moj-bankar.hr/Kazalo/N/Neto-sada%20ninja-vrijednost>

[21] <http://limun.hr/main.aspx?id=27366>